

Разработка модели и оценка характеристик элементов конструкции ТВС в составе цифрового двойника АЭС

А.А. Рябов (ООО «СИНЦ»), В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев, Ю.Н. Надинский, А.П. Скибин (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)

Современный уровень развития компьютерного моделирования позволяет выявлять и надежно решать широкий круг сложных прикладных проблем на всех этапах проектирования новых наукоемких изделий, обеспечивая эффективный поиск оптимальных конструкторских решений, сокращает сроки разработки и объемы натурных испытаний, заменяя их высокоточными расчетами. Компьютерные расчеты дают полную картину поведения изделия в исследуемых режимах работы, их достоверность подтверждается сравнением с экспериментальными измерениями в отдельных точках. Органичное сочетание численного моделирования и экспериментов служит основой создания новых высоконадежных и эффективных наукоемких изделий.

Одним из основных приоритетных направлений в повышении конкурентоспособности продукции российских предприятий стало создание «цифровых двойников». В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации «Цифровая экономика Российской Федерации», данная инициатива является первостепенной в задачах исследования полных детализированных моделей разрабатываемых изделий.

Специалистами Саровского Инженерного Центра (СИНЦ) и ОКБ «ГИДРОПРЕСС» разработаны валидированные расчетные подходы в решении задач тепломассопереноса, использование которых на основе программных средств *Simcenter STAR-CCM+* делает возможным проведение совместной работы с предприятиями атомной отрасли России по решению комплексных задач построения цифровых двойников изделий и моделирования режимов их работы.

Simcenter STAR-CCM+ от *Siemens Digital Industries Software* представляет собой комплексный пакет программ для решения задач механики жидкости, газа и деформируемого твердого тела, теплопередачи, динамики частиц, динамики течений, электрохимии, электромагнетизма, акустики и реологии. *STAR-CCM+* предлагает технологию точных и эффективных расчетов – с единым интегрированным интерфейсом пользователя и автоматизированными рабочими процессами, – что обеспечивает простой способ для проведения анализа и решения сложных практических задач. Применяя *STAR-CCM+* на всех этапах проектирования, можно с высокой точностью прогнозировать характеристики изделия, сокращать расходы на его натурные испытания.

В атомной энергетике АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» является одним из наиболее важных, многолетних партнеров СИНЦ. За годы плодотворного взаимовыгодного сотрудничества предприятий накоплен положительный опыт решения ряда важных прикладных проблем теплогидравлики и механики деформируемого твердого тела, способствующий повышению эффективности работы и безопасности элементов конструкций ядерных энергетических установок, разрабатываемых АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Сотрудничество АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ООО «Саровский Инженерный Центр» продолжается, активно способствуя развитию новых проектов ГК «Росатом», разрабатываемых в настоящее время, и повышению привлекательности российских наукоемких технологий в мире.

Описание конструкции и расчетной области

Тепловыделяющая сборка (ТВС) является составной частью активной зоны реакторов атомных электростанций с реакторной установкой (РУ) ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и др. ТВС предназначена для генерирования тепла и передачи его с поверхности тепловыделяющих элементов (*ТВЭЛ*ов и *ТВЭЛ*ов) теплоносителю в течение проектного срока службы. Конструкция ТВС РУ с ВВЭР должна обеспечивать требуемые показатели эффективности топливоиспользования, безопасности и эксплуатационной надежности и обеспечивать конкурентоспособность проекта АЭС на мировом рынке.

Конструктивно тепловыделяющая сборка состоит из следующих элементов: пучок ТВЭЛ, направляющие каналы (НК), хвостовик с нижней опорной решеткой (НОР), инструментальный канал, дистанционирующие решетки (ДР) и головка. Пучок ТВЭЛ закрепляется в каркасе, состоящем из направляющих каналов и ДР, а снизу пучок крепится в НОР. Основной конструктивной особенностью рассматриваемой ТВС является шестиугольное поперечное сечение и размещение ТВЭЛ в топливной сборке по треугольной решетке.

Дистанционирование ТВЭЛ осуществляется ДР сотового типа, которая представляет собой набор ячеек, приваренных друг к другу и заключенных в обод, имеющий скосы для исключения возможности зацепления с соседней кассетой при загрузке-выгрузке. Ячейки решетки имеют шестигранную форму с пуклевками по трем углам, расположенным через 120°, для дистанционирования ТВЭЛ.

Профиль пуклевок ячейки ДР и их упругопластические свойства обеспечивают закрепление твэлов в пучке [1].

В рамках модернизации конструкции ТВС была разработана новая НОР, которая является более технологичной в производстве, после чего возникла необходимость определить её гидравлические характеристики и влияние на распределение скорости (расход) теплоносителя в нижней части ТВС. Важно отметить, что распределение скорости в пучке твэл оказывает влияние на теплообмен, а гидравлическое сопротивление нижней опорной решетки используется в качестве исходных данных для теплогидравлических расчетов и анализа безопасности.

Общепринятой практикой для определения коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) и других характеристик новой конструкции является проведение дорогостоящих экспериментальных исследований. Однако в рамках представленной в настоящей статье работы задача решается расчетным способом с применением трехмерных моделей и средств вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics, CFD*), что позволяет решить проблему и непосредственно из расчета определить необходимые параметры: КГС и неравномерность скорости теплоносителя [2, 3].

Для выполнения представленной выше задачи были выполнены расчеты с последующим сравнительным анализом НОР двух конструкций: базовой

(штатной) и новой. Рассматриваемые НОР различаются степенью перфорации, что обусловлено различной геометрией проливных отверстий.

В расчетную область были включены следующие элементы ТВС и реактора:

- перфорированная опорная труба;
- хвостовик ТВС с НОР;
- ДР №1 (расположена в 100 мм от НОР);
- 312 твэл (до середины пролета между ДР №1 и ДР №2);
- 18 направляющих каналов (до середины пролета между ДР №1 и ДР №2);
- инструментальный канал (до середины пролета между ДР №1 и ДР №2).

На рис. 1 представлена геометрия расчетной области в окрестности отверстий НОР.

Теплофизические свойства теплоносителя приняты постоянными для реакторных условий (давление 16.2 МПа и температура 298.2°C) и приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры теплоносителя при реакторных условиях

Параметр	Значение
Плотность, кг/м ³	731.48
Динамическая вязкость, Па·с	8.95·10 ⁻⁵

Математическая модель и обработка результатов

Математическая модель состоит из следующей системы дифференциальных уравнений, описывающей турбулентное движение несжимаемой вязкой жидкости:

– уравнение движения:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_i,$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0,$$

где ρ – плотность; p – давление; μ – динамическая вязкость; μ_t – турбулентная вязкость; τ_{ij} – тензор касательных напряжений; g_i – проекция ускорения свободного падения; u_i – скорость в проекциях на оси координат x, y, z .

При этом стоит отметить, что в данном случае давление рассчитывается без учета гидростатического столба.

Тензор касательных напряжений определяется по следующей зависимости:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij},$$

где μ и μ_t – динамическая и турбулентная вязкость, k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, δ_{ij} – символ Кронекера.

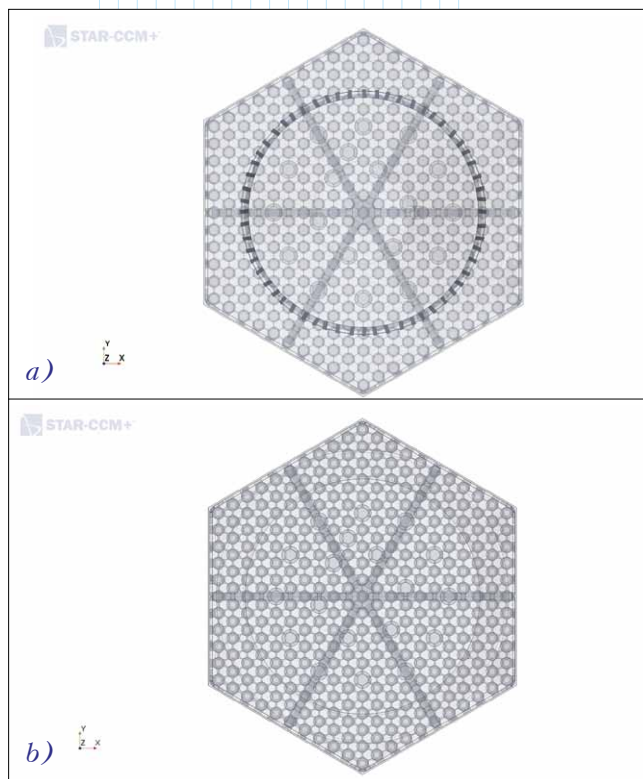


Рис. 1. Расчетная область в окрестности отверстий НОР: а) базовая конструкция; б) новая конструкция

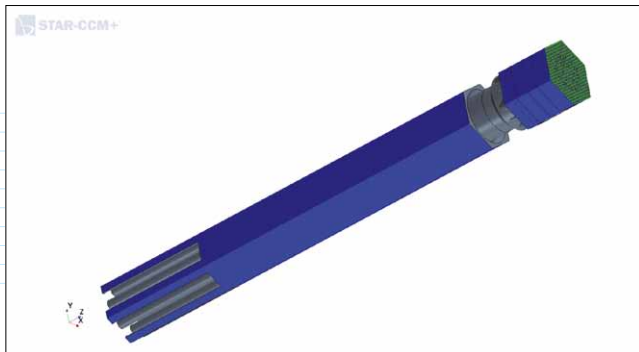


Рис. 2. Расчетная область с граничными условиями:
 • поверхность Γ_1 – граничное условие на входе;
 • поверхность Γ_2 – граничное условие на выходе;
 • поверхность Γ_3 – стенки расчетной области;
 • Γ_4 – граничное условие симметрии



Рис. 3. Расчетная область с граничными условиями (границы симметрии не показаны):
 • поверхность Γ_1 – граничное условие на входе;
 • поверхность Γ_2 – граничное условие на выходе;
 • поверхность Γ_3 – стенки расчетной области

Для определения турбулентной вязкости и кинетической энергии турбулентных пульсаций была использована $k-\omega$ SST модель турбулентности [4, 5].

На внешних границах межтвэльного пространства ТВС и опорной трубы задавалось граничное условие симметрии. На остальных границах были заданы стенки с условием прилипания. Подогрев теплоносителя на начальном участке не учитывался.

Расчетная область, образованная поверхностями четырех типов ($\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$), показана на рис. 2.

На рис. 3 представлена расчетная модель (границы симметрии не показаны). Условия однозначности для данной задачи состоят из замыкающих соотношений и граничных условий.

Граничные условия:

– первого рода для уравнений движения на входе (Γ_1):

$$u_j(\vec{r}) = (\vec{u}_{\text{вх}}(\vec{r}), \vec{x}_j), \vec{r} \in \Gamma_1,$$

где x_j – орт декартовой системы координат; $u_{\text{вх}}$ – распределение вектора скорости теплоносителя во входном сечении Γ_1 ;

– второго рода для уравнений движения на выходе (Γ_2):

$$\frac{\partial u_j(\vec{r})}{\partial n} = 0, \vec{r} \in \Gamma_2,$$

– условия прилипания для уравнений движения на поверхности Γ_3 :

$$u_j(\vec{r}) = 0, \vec{r} \in \Gamma_3,$$

– условия симметрии на поверхности Γ_4 :

$$\frac{\partial u_j(\vec{r})}{\partial n} = 0, \vec{r} \in \Gamma_4,$$

где j – номер оси декартовой системы координат ($j = 1, 2, 3$).

Выбор расчетной области и параметров построения сетки был произведен в соответствии с



Рис. 4. Модель без опорной трубы

рекомендациями [6]. Кроме того, дополнительно для базовой конструкции НОР проводился анализ чувствительности результатов к граничным условиям на входе, которые определяются предысторией потока (неравномерные турбулентные профили, профили скорости и давления). Для этого решалась задача с прямым подводом теплоносителя (без опорной трубы) к хвостовику и подводом теплоносителя с учетом опорной трубы. Модель без опорной трубы представлена на рис. 4.

Сеточная модель

Сетка расчетной области строилась с помощью встроенного сеточного генератора STAR-CCM+ на основе многогранных (*polyhedral*) ячеек с выделением призматических пограничных слоев [7]. Для экономии ресурсов в области твэльного пучка применена экстрюзия ячеек.

На иллюстрациях показана расчетная сетка различных частей расчетной области:

- в области перехода опорной трубы в хвостовик (рис. 5);
- в области перфорации опорной трубы (рис. 6);
- в области уголка хвостовика и НОР (рис. 7);
- в области ДР (рис. 8).

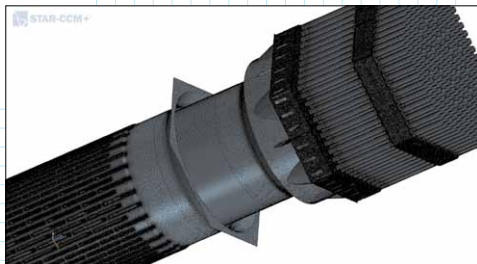


Рис. 5. Расчетная сетка в области перехода опорной трубы в хвостовик

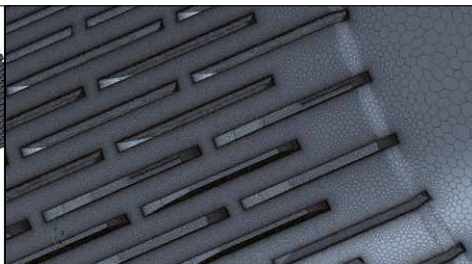


Рис. 6. Расчетная сетка в области перфорации опорной трубы



Рис. 7. Расчетная сетка в области уголка хвостовика и нижней опорной решетки



Рис. 8. Расчетная сетка в области дистанционирующей решетки

Табл. 2. Размерность расчетной сетки элементов расчетной области

	Опорная труба	ДР и пучок	Хвостовик с НОР
Размерность сетки, млн. ячеек	48	26.6	21.5
Размерность сетки, млн. вершин	219.1	98.3	81

Всего были разработаны две сеточные CFD-модели, отличающиеся геометрией проливных отверстий нижней опорной решетки. Общая размерность сетки каждой модели составила ~100 млн. ячеек и ~400 млн. вершин. Параметры сетки элементов расчетной области представлены в табл. 2.

Обработка результатов

В соответствии с методикой обработки экспериментальных данных, КГС хвостовика определяется на основе перепада давления между датчиками, расположенными в центре трубы до нижнего торца хвостовика и в измерительном канале в центре имитатора ТВС после НОР. Однако, в соответствии с [8], при гидравлических расчетах перепад давления определялся на основе среднего значения по сечениям расчетной области.

Таким образом, при обработке CFD-результатов значения КГС хвостовика с НОР для базовой и новой конструкций нижней опорной решетки были получены двумя способами:

1) Перепад давления определялся на основе точек, расположенных в центре трубы до нижнего торца хвостовика и в измерительном канале в центре имитатора ТВС после НОР (КГС-1).

2) Перепад давления определялся на основе среднего значения по сечениям расчетной области в местах расположения датчиков отбора давления (КГС-2).

Для анализа неравномерности скоростей удобно пользоваться интегральными осредненными результатами. На рис. 9 приведена расчетная схема разбиения на ячейки. Данная нодализационная схема соответствует ячейковой модели, аналогичной [9]. При обработке результатов в соответствии с этой расчетной схемой, интегрирование проводится только по области жидкости.

Результаты расчета

Расчеты выполнялись с помощью теплогидравлического программного комплекса STAR-CCM+. Для расчета была выбрана двухпараметрическая $k-\omega$ -SST модель турбулентности.

Все значения КГС приведены в относительных величинах, где в качестве реперной единицы использовалось значение, полученное экспериментально для ТВС АЭС-2006 на стенде горячей обкатки в АО ОКБ "ГИДРО-ПРЕСС". Как видно из табл. 3, результаты CFD-расчета хорошо совпадают с экспериментальными значениями КГС для автомобильной области чисел Рейнольдса. Для новой конструкции КГС оказался выше примерно в полтора раза.

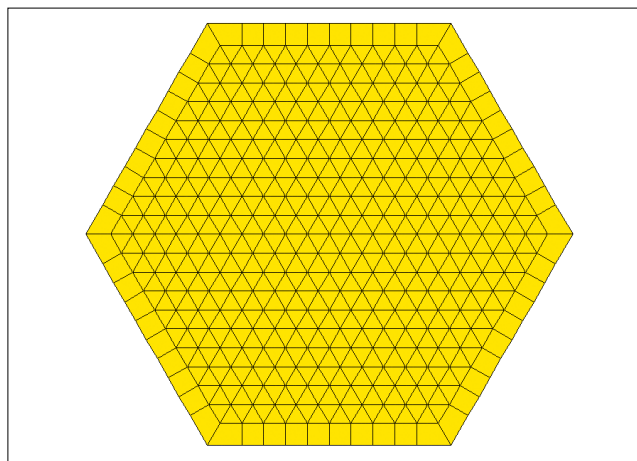


Рис. 9. Схема разбиения на ячейки

Табл. 3. Нормированные значения КГС хвостовика для автомоделной области чисел Рейнольдса

Базовая конструкция НОР (CFD)	Новая конструкция НОР (CFD)	ТВС АЭС-2006 (эксперимент)
0.98	1.46	1

Результирующие значения КГС хвостовика для автомоделной области чисел Рейнольдса с опорной трубой и без, определенные двумя способами, приведены в табл. 4. Как видно из таблицы, для определения КГС хвостовика с помощью CFD следует учитывать опорную трубу – в противном случае получаем относительную погрешность до 30%. Значительное влияние оказывает и метод определения КГС.

Табл. 4. Нормированные значения КГС хвостовика

	С опорной трубой	Без опорной трубы
КГС-1	0.98	1.42
КГС-2	1.25	1.38

На рис. 10 представлены нормированные зависимости КГС НОР от числа Рейнольдса для базовой и новой конструкций (нормировка также проводилась с использованием значения КГС для автомоделной области чисел Рейнольдса).

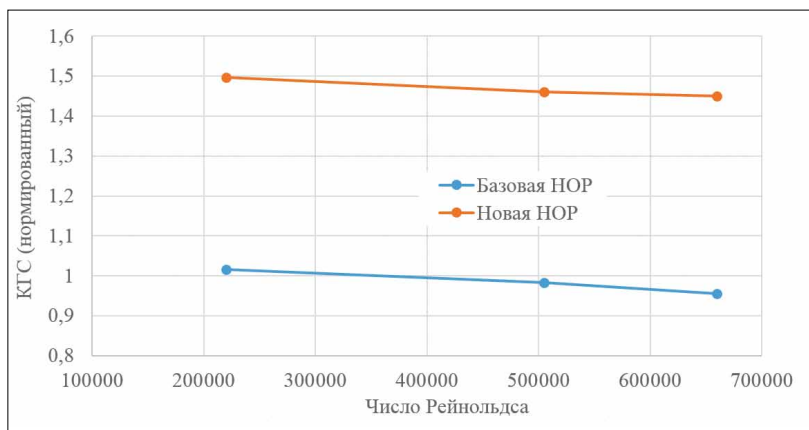


Рис. 10. Зависимость КГС НОР от числа Рейнольдса

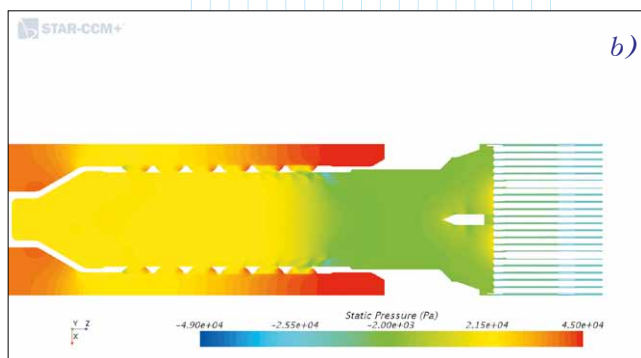
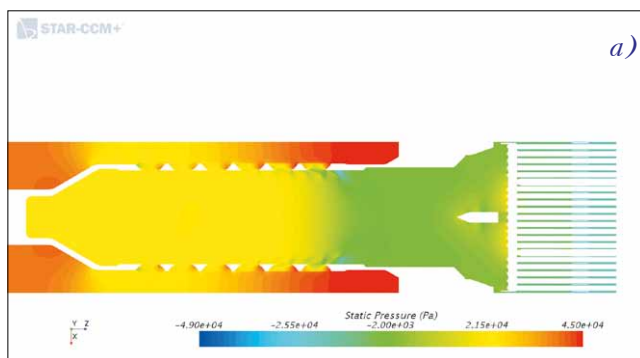


Рис. 11. Распределение статического давления: а) базовая конструкция; б) новая конструкция

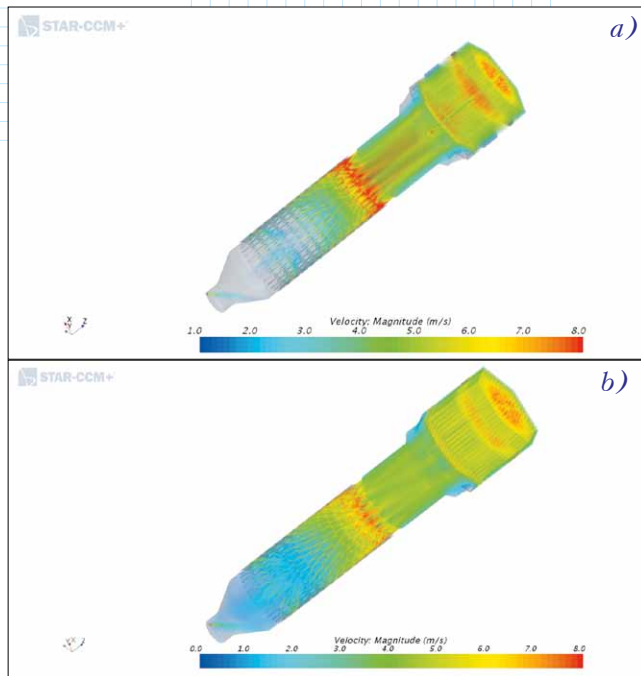


Рис. 12. Распределение модуля скорости: а) базовая конструкция; б) новая конструкция

Распределение статического давления в сечении расчетной области для базовой и новой конструкций НОР показано на рис. 11. Наблюдается неравномерный по сечению профиль давления, что объясняет разницу в результатах для КГС при различных способах обработки.

На рис. 12 представлено объемное распределение скорости в расчетной области. Здесь наблюдается неравномерность скорости с максимумом в центре, а далее идет выравнивание, что

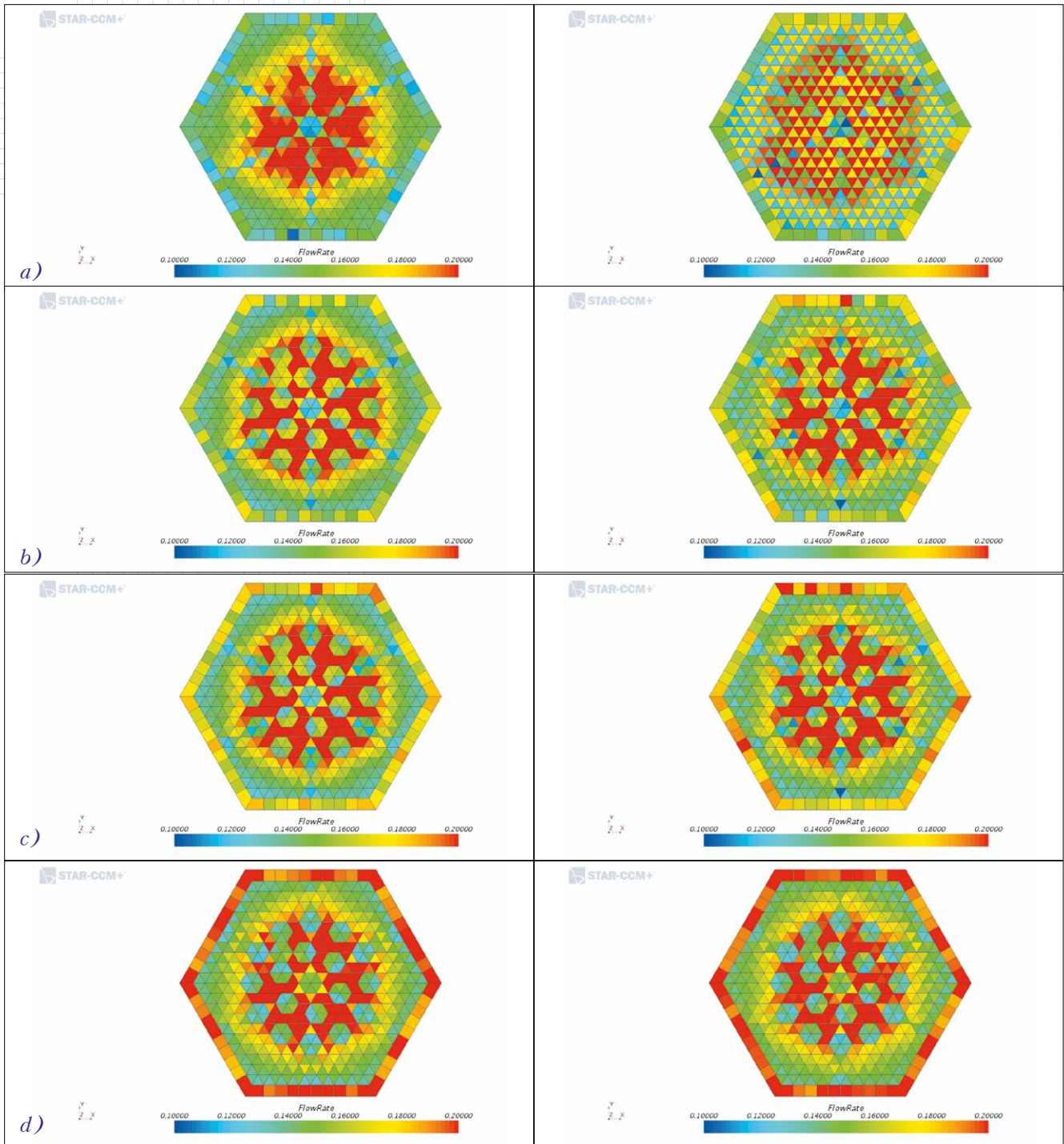


Рис. 13. Распределение расходов по ячейкам для номинального расхода через ТВС:
 а) расстояние 1 мм после НОР; б) расстояние 25 мм после НОР; в) расстояние 50 мм после НОР;
 д) расстояние 100 мм после НОР

объясняет разницу в методах обработки и получения КГС (см. табл. 4).

На рис. 13, иллюстрирующем распределение расходов по ячейкам (см. рис. 9) для номинального режима работы РУ, хорошо видна неравномерность


расходов. После НОР максимумы расходов наблюдаются в центре пучка, а ближе к ДР №1 – также и на периферии твэльного пучка. Однако стоит отметить, что это связано с большей площадью проходных сечений периферийных ячеек.

Заключение

Авторами были разработаны *CFD*-модели участка, имитирующие входную часть ТВС и включающие в себя: перфорированную опорную трубу, хвостовик, нижнюю опорную решетку (базовой и новой конструкций), ДР №1, 312 твэл, 18 направляющих каналов и экспериментальный канал до середины пролета между ДР №1 и ДР №2.

Далее были проведены *CFD*-расчеты хвостовика с базовой и новой конструкциями НОР и оценка влияния граничных условий, показавшая необходимость учета опорной трубы. Для обеих конструкций получены зависимости КГС хвостовика от числа Рейнольдса. У новой конструкции значение КГС НОР для автомодельной области чисел Рейнольдса оказалось примерно в 1.5 раза выше, чем у базовой. Сравнение расчетного КГС хвостовика базовой конструкции с экспериментальными данными показало хорошее соответствие результатов.

Таким образом, применение методов вычислительной гидродинамики служит хорошей поддержкой при проектировании оборудования АЭС. Стоит отметить, что *CFD*-анализ не заменяет эксперимент, а наоборот, валидация

расчета происходит с опорой на экспериментальные данные; при этом расчет позволяет гармонично дополнить эксперимент данными, недоступными для прямого измерения. 

ООО “Саровский Инженерный Центр” (СИНЦ) было создано в Технопарке “Саров” в 2006 году для эффективного внедрения современных компьютерных технологий, проектирования новых изделий и практического решения широкого круга прикладных задач прочности и тепломассопереноса. Специалисты компании обладают многолетним опытом сотрудничества с российскими и зарубежными предприятиями атомной энергетики, авиационно-космического комплекса, автомобилестроения и судостроения, машиностроения, нефтегазовой промышленности, гражданского строительства и других наукоемких отраслей промышленности.

АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” является главным конструктором реакторных установок с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) широкого диапазона мощности. Предприятие осуществляет сложный комплекс конструкторских, расчетно-теоретических, экспериментально-исследовательских и производственных работ по созданию реакторных установок для АЭС различного назначения, обладающих свойствами повышенной безопасности, надежности и экономичности, конкурентоспособных в Российской Федерации и за рубежом.

Литература

1. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. Москва: ИКЦ “Академкнига”, 2004, 220 с.
2. Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А. и др. Разномасштабные задачи тепло-массообмена в атомной энергетике // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2017, т. 6, №4.
3. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics, 2002.
4. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc., 2000.
5. Menter F. Zonal two equation k-turbulence models for aerodynamic flows // Proceedings of 24th Fluid Dynamics Conference, 1996.
6. Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications // NEA/CSNI/R (2014)11 // Nuclear Energy Agency. Committee on the Safety of Nuclear Installations, 2015, 176 p.
7. Siemens PLM Software. STAR-CCM+ Documentation Version 12.02, 2017, 11271 p.
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. Москва: Машиностроение, 1992, 672 с.
9. Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А. и др. CFD моделирование экспериментального участка 37-стержневого стэнда // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2018, с. 96–103.

Об авторах

Александр Алексеевич Рябов – директор ООО “СИНЦ”, д-р физ.-мат. наук

Александр Петрович Скибин – начальник группы в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, к.т.н.

Василий Юрьевич Волков – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, к.т.н.

Лука Антонович Голибродо – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, к.т.н.

Алексей Александрович Крутиков – ведущий инженер-конструктор в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, к.т.н.

Олег Вячеславович Кудрявцев – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”

Юрий Николаевич Надинский – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”